

13. Caratterizzazione sperimentale

13.1. Generalità

Nella progettazione con materiali compositi è prassi piuttosto consolidata valutare le caratteristiche della singola lamina a partire da quelle dei singoli componenti, fibra e matrice, utilizzando le relazioni della micromeccanica. Tale approccio, specie utilizzando uno strumento di calcolo automatico, ha il vantaggio di permettere una rapida valutazione delle proprietà della singola lamina e quindi del laminato utilizzando la teoria classica dei laminati.

Come visto ai capitoli precedenti, micromeccanica e macromeccanica permettono una attendibile valutazione delle principali proprietà elastiche di lamina (micromeccanica) e laminati (macromeccanica) mentre meno attendibili risultano le previsioni teoriche circa la resistenza, per la quale è sempre buona norma fare riferimento a risultati sperimentali relativi allo stesso materiale o, in assenza di questi, a materiali simili.

Si è già visto come il comportamento elastico di una lamina ortotropa è univocamente definita nel piano da 4 costanti: due moduli di elasticità longitudinale, uno trasversale ed un coefficiente di Poisson. La resistenza è definita invece da 5 parametri: la resistenza a trazione e compressione in direzione longitudinale e trasversale e la resistenza a taglio.

Le prove sperimentali sui compositi permettono in genere di determinare sia le caratteristiche elastiche (che possono servire al minimo a convalidare i risultati della micromeccanica), sia la resistenza meccanica della lamina ortotropa che costituisce il classico “mattone” con cui si costruiscono i laminati.

Per le prove sperimentali si utilizzano solitamente laminati unidirezionali il cui comportamento è evidentemente lo stesso di quello della singola lamina. Non mancano però casi in cui non disponendo di laminati unidirezionali le prove sono condotte su laminati con lame disposte in modo vario. In questi casi le caratteristiche della singola lamina sono dedotte a partire dai dati sperimentali utilizzando, a ritroso, la teoria classica della laminazione.

Nel seguito sono esposte le prove sperimentali di più largo uso per la determinazione delle proprietà elastiche e della resistenza statica dei materiali compositi. Per quasi tutte le prove esistono delle norme (vedi per esempio le americane ASTM) che ne stabiliscono in sintesi modalità e limitazioni principali. Si rimanda a queste per maggiori dettagli sull’argomento.

13.2. Prova di trazione

Come per i materiali tradizionali, anche per i compositi la prova di caratterizzazione più semplice ed allo stesso tempo più usata è quella di trazione.

Essa consente la determinazione dei moduli di elasticità longitudinali E_L ed E_T , del coefficiente di Poisson ν_{LT} e della resistenza a trazione in direzione longitudinale ($\sigma_{L,R}$) e trasversale ($\sigma_{T,R}$).

Poiché il materiale composito è disponibile in forma di laminati, per questa prova sono solitamente utilizzati provini a sezione trasversale rettangolare del tipo illustrati in fig.1.

Con riferimento alla geometria delle teste si distinguono due tipi di provini: provini “dog bone” con teste raccordate (fig.1a), e provini retti con rinforzi di estremità (fig.1b). Inoltre, il collegamento di tali provini con la macchina di carico può avvenire o mediante foro e spina (fig.1c) o mediante ganasce (vedi fig.1d).

Tra le varie possibili configurazioni del provino la migliore è quella con teste rettilinee rinforzate ammorsata con idonee ganasce. L’uso del provino “dog bone”, infatti, può dar luogo a rotture in corrispondenza del raccordo rendendo così difficile la valutazione delle caratteristiche di resistenza. Il collegamento con foro e spina inoltre è pure da evitare in quanto può dar luogo a facili rotture per taglio in prossimità del foro.

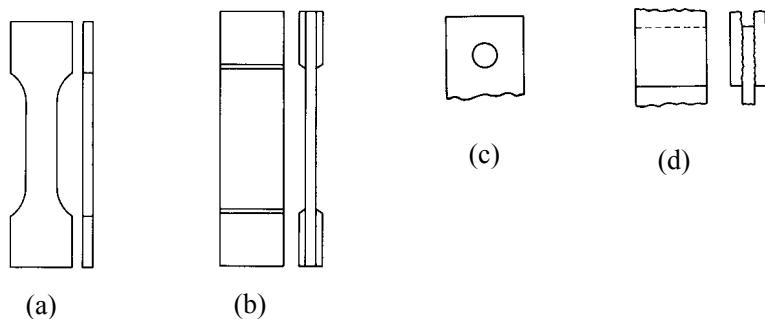


Fig.1 – Geometria di provini usati nella prova di trazione e modalità di ammorsaggio: (a) provino tipo “dog bone”, (b) provino rettilineo con rinforzi, (c) collegamento foro spina e (d) collegamento a ganasce.

Per la determinazione delle proprietà elastiche del composito è necessario misurare, oltre il carico applicato, anche le deformazioni longitudinale e trasversale subite dal provino nella zona utile centrale. A tal fine il carico è generalmente misurato mediante la cella di carico di cui solitamente dispone la macchina di prova mentre le deformazioni sono misurate mediante uso di 2 estensometri o 2 estensimetri disposti in direzione longitudinale e trasversale.

L’uso di un provino con fibre allineate col carico permette in pratica di rilevare il modulo di Young longitudinale E_L (tangente alla curva $\sigma_L - \epsilon_L$ all’origine), il coefficiente di Poisson maggiore ν_{LT} pari all’opposto del rapporto tra deformazione trasversale e longitudinale, e la resistenza a rottura a trazione longitudinale $\sigma_{L,R}$, pari al rapporto tra carico di rottura e sezione resistente. L’uso di un provino con fibre ortogonali al carico permette in modo analogo di ottenere il modulo di Young in direzione trasversale E_T e la resistenza a rottura a trazione in direzione trasversale ($\sigma_{T,R}$).

Utilizzando provini con fibre inclinate rispetto all’asse del provino si possono determinare direttamente anche le proprietà elastiche in una generica direzione. In questo caso è però necessario tenere conto dell’accoppiamento tra trazione e taglio: il carico di trazione semplice applicato produce anche distorsioni del provino che a rigore non devono essere impediti dal dispositivo di bloccaggio (ganasse) che altrimenti finisce per applicare anche una distribuzione di tensioni tangenziali che possono modificare lo stato di deformazione. Tali inconvenienti, che possono essere in gran parte risolti utilizzando un provino snello (rapporto lunghezza/larghezza maggiore di 12) ed eseguendo le misure rigorosamente nella parte centrale del provino, fanno sì che nella pratica comune si preferisce determinare direttamente solo le grandezze elastiche principali (secondo gli assi del materiale) mentre quelle relative ad una generica direzione sono valutate mediante le relazioni teoriche dedotte utilizzando le leggi di trasformazione di tensioni e deformazioni nell’intorno del punto (vedi cap.4).

In alternativa alla prova di trazione, le stesse caratteristiche del materiale possono essere determinate mediante prova di flessione eseguita utilizzando un provino ottenuto incollando sulle due facce opposte di un core in alluminio o simili, due provini spezzoni di laminato. In questo modo si può eseguire contemporaneamente sia la prova di trazione che di compressione e si possono utilizzare anche lamine sottili. Questo tipo di provino è utilizzato particolarmente in campo aeronautico ove sono molto diffusi elementi sandwich di questo tipo.

13.3. Prova di compressione

Rispetto alla prova di trazione la prova di compressione risulta certamente ben più complessa per le difficoltà legate a possibile instabilità del provino e nonché a fenomeni di schiacciamento e sfibramento (brooming) delle estremità (vedi fig.2a).

Al fine di limitare l’instabilità si usano provini di grosso spessore ovvero opportune guide laterali capaci di impedire l’inflessione del provino. Al fine di evitare invece gli effetti di brooming si ricorre all’uso di morsetti di estremità, cioè di elementi di contenimento applicati alle estremità del

provino (vedi fig.2b).

Come nella prova di trazione, il carico applicato al provino viene misurato tramite la cella di carico di cui è dotata la macchina di prova mentre le deformazioni sono misurate con estensimetri elettrici a resistenza (l'uso di estensometri è ora reso difficile dagli elevati spessori del provino).

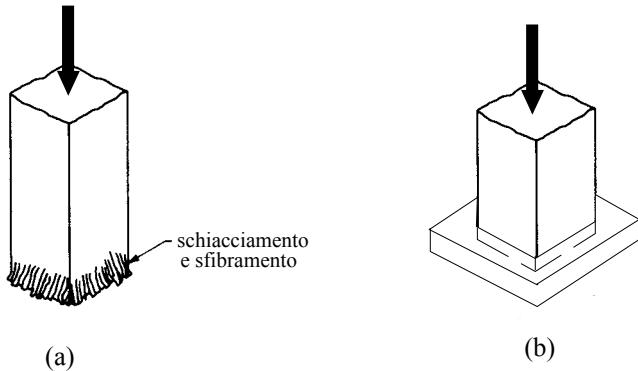


Fig.2 – Provini usati nella prova di compressione: (a) provino semplice e (b) con morsetti di estremità.

Le caratteristiche elastiche si determinano in modo del tutto analogo a quanto visto per la trazione. Per quanto concerne invece la determinazione della resistenza a compressione è in genere necessario usare un provino con parte centrale a sezione ridotta al fine di evitare che la rottura avvenga nelle zone terminali ammorsate.

Ovviamente l'uso dei provini a trave sandwich permette ove possibile di evitare la maggior parte di tali inconvenienti.

13.4. Prova di taglio

Mediante la prova di taglio si determinano la resistenza a taglio $\tau_{LT,R}$ ed il modulo di elasticità trasversale G_{LT} . E' necessario a tal fine assoggettare il materiale ad uno stato di tensione di taglio puro. Il modo più semplice per ottenere ciò consiste nell'assoggettare un cilindro cavo di piccolo spessore ad una sollecitazione di momento torcente semplice (vedi fig.3).

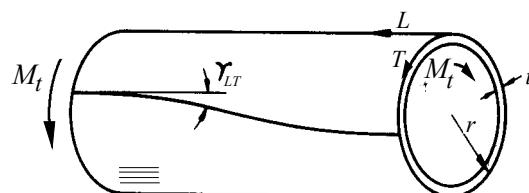


Fig.3 – Provino cilindrico usato nella prova di taglio: geometria e notazione generale.

Per cilindro di piccolo spessore le variazioni delle tensioni tangenziali nello spessore possono ritenersi trascurabili. Con fibre allineate con l'asse del cilindro la tensione tangenziale τ_{LT} è legata al momento torcente dalla nota relazione:

$$\tau_{LT} = \frac{M_t}{2\Omega t} \quad \text{con} \quad \Omega = \pi r^2. \quad (1)$$

Tenendo conto dell'accoppiamento torsione-trazione è necessario che il collegamento del tubo con

la macchina di prova consenta la libera deformazione assiale del provino durante la prova.

Per la determinazione di resistenza e modulo di taglio è necessario misurare il momento torcente applicato e lo scorrimento. Come al solito il momento applicato viene determinato mediante la cella di carico della macchina di prova mentre lo scorrimento è determinato utilizzando estensimetri elettrici a resistenza installati secondo eliche inclinate di 45° rispetto all'asse del cilindro. E' questa infatti la direzione della massima deformazione principale ε_{max} che risulta pari alla metà dello scorrimento (vedi cerchi di Mohr), cioè $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{45^\circ} = \gamma_L/2$.

Oppunti accorgimenti devono pure essere usati per evitare il verificarsi di fenomeni di instabilità (guide ausiliarie) nonché per evitare che la rottura avvenga in prossimità delle estremità ammorsate (rinforsi di estremità).

Non disponendo di elementi cilindrici cavi, la prova di taglio può essere eseguita in alternativa con dispositivi che permettono l'uso dei comuni laminati piani. Tra i vari tests messi a punto i più usati sono il *picture frame test* nel quale il provino, costituito da una lastra quadrata, è imbullonato ai quattro lati ad un quadrilatero deformabile (vedi fig.4a), il *rail shear test* nel quale una striscia di laminato viene imbullonata ai due lati lunghi a due barre metalliche soggette a trazione (vedi fig.4b) ed il *sandwich cross-beam test*, nel quale una lastra a croce viene incollata ad un core soggetto ad un sistema di carichi secondo lo schema indicato in fig.4c.

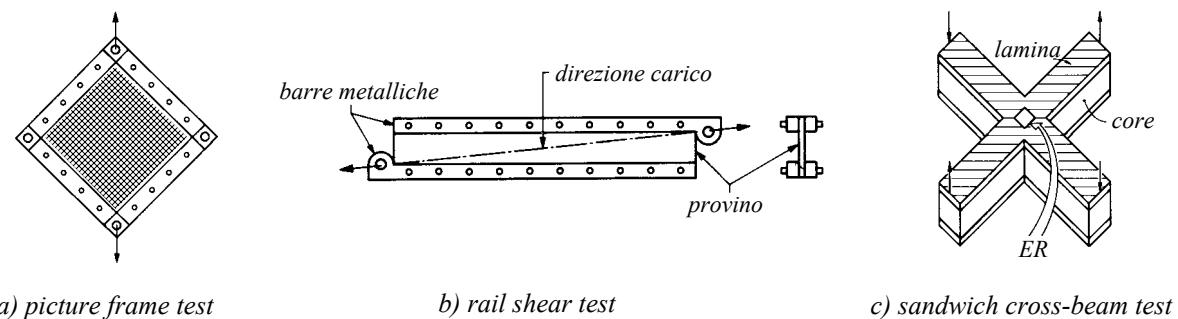


Fig.4 – Altri tests e relativi dispositivi di carico utilizzati per la caratterizzazione a taglio.

Tali tests non permettono in genere la determinazione di entrambe le ricercate caratteristiche del materiale, cioè il modulo di elasticità trasversale e la resistenza a taglio.

Per esempio il *picture frame test* permette la determinazione della resistenza a taglio del materiale ma non del modulo di elasticità trasversale in quanto il quadrilatero consente di ottenere uno stato tensionale di taglio puro solo in prossimità del contorno del modello e non al centro dello stesso. Al contrario il *rail shear test* può essere vantaggiosamente utilizzato soltanto per la determinazione del modulo di elasticità trasversale, purché il modello sia sufficientemente snello ($l/b > 12$). Similmente il *sandwich cross-beam test* può essere utilizzato solo per la determinazione del modulo di elasticità trasversale purché l'estensimetro sia sufficientemente piccolo e situato nella zona centrale del provino. Con questo provino infatti la resistenza a rottura non può essere misurata per via delle elevate concentrazioni di tensione che si verificano in corrispondenza degli angoli interni del provino.

13.5. Prova di flessione

Sovente i laminati compositi sono utilizzati per la realizzazione di elementi soggetti a sollecitazione con flessione predominante. In questi casi è particolarmente utile conoscere la resistenza a flessione di tali laminati.

Le prove più largamente utilizzate a tal fine sono la prova di flessione a 3 punti e la prova di flessione a 4 punti (vedi fig.5).

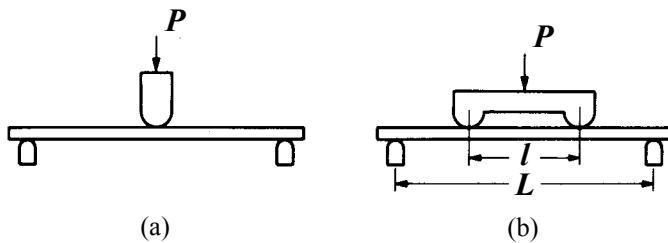


Fig.5 – Prova di flessione: (a) flessione a 3 punti e (b) flessione 4 punti.

La prova a 3 punti è più semplice di quella a 4 punti ma da luogo ad un momento flettente variabile lungo l'asse della trave, mentre la prova a 4 punti permette di ottenere nella zona centrale compresa tra i due carichi un momento flettente costante senza sforzi di taglio.

Nella prova a 3 punti la presenza del taglio può indurre rottura per delaminazione piuttosto che per flessione (rottura delle fibre) rendendo così impossibile la corretta determinazione della resistenza a flessione. Questo fenomeno si può anche verificare nel provino a 4 punti, limitatamente alle due zone laterali. Al fine di evitare tali inconvenienti è necessario aumentare quanto possibile il rapporto $R_{f/t}$ tra la massima sollecitazione di flessione (che avviene in superficie) e la massima sollecitazione di taglio (che avviene sull'asse neutro), cioè:

$$R_{f/t} = \frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} = \frac{6M/(bh^2)}{3P/(2bh)} = \frac{4M}{Ph} = \begin{cases} L/2h & (3 \text{ punti}) \\ (L-l)/2h & (4 \text{ punti}) \end{cases} \quad (2)$$

L'uso di rapporti troppo elevati può però dar luogo a frecce eccessive (non linearità) con nascita di anomalie reazioni vincolari orizzontali. Al fine di evitare tali inconvenienti è bene usare valori di $R_{f/t}$ non superiori a 16.

Nel caso di laminati non simmetrici, nei quali si ha un accoppiamento tra flessione e torsione, la prova può essere complicata da distacchi parziali del provino dagli appoggi causati dalla deformazione di torsione. In questi casi, al fine di minimizzarne gli effetti sul risultato della prova, è necessario utilizzare provini relativamente allungati ed appoggi bilaterali.

13.6. Prova di delaminazione

Come visto nei capitoli precedenti, la rottura di un laminato può avvenire sovente a seguito di delaminazione causata dalla concentrazione di un elevato numero di difetti in prossimità dell'interfaccia tra due lamine successive ovvero dalla presenza di elevate tensioni interlaminari.

Per quanto osservato al capitolo precedente, la resistenza alla delaminazione di un laminato composito può essere determinata mediante uso di una trave corta con basso rapporto $R_{f/t}$ (*short-beam shear test*). Le dimensioni della trave vanno fissate in modo da assicurare che la rottura della stessa avvenga per taglio (delaminazione) e non per flessione (rottura delle fibre). La delaminazione avviene solitamente mediante formazione e crescita di una cricca interlaminare in prossimità dell'asse neutro.

In alternativa alla trave corta si possono pure usare due provini intagliati come in fig.6 soggetti uno a trazione ed uno a compressione.

La profondità degli intagli va opportunamente regolata in modo da avere una rottura per delaminazione piuttosto che per trazione in corrispondenza della zona di concentrazione delle tensioni. Si tratta comunque di una prova più complessa della precedente che per questo è in assoluto la prova di delaminazione più utilizzata.

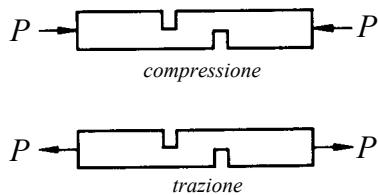


Fig.6 – Prova di delaminazione mediante uso di coppia di provini intagliati

13.7. Prova di frattura

Come visto ai capitoli precedenti, i concetti della meccanica della frattura sviluppati per i materiali tradizionali, possono essere in linea di principio estesi anche ai materiali anisotropi come i laminati compositi a fibre lunghe, sebbene la loro utilità risulta soggetta a notevoli limitazioni stando il fatto che nei compositi, a differenza di quanto accade negli isotropi, a causa della intrinseca eterogeneità del materiale, le modalità di propagazione di una stessa cricca possono differire significativamente da una prova all'altra (prove non ripetibili) e la usuale presenza di cricche multiple risulta di difficile trattazione.

I concetti della MFLE sono di più facile applicazione nei compositi a fibre corte che esibiscono in pratica un comportamento isotropo nel piano del laminato.

La resistenza alla frattura di un composito viene determinata utilizzando provini del tutto simili a quelli in uso per i materiali tradizionali. In particolare sono utilizzati (vedi fig.7) il provino a trazione con singola cricca laterale (single-edge-notched, SEN) o con doppia cricca laterale (double-edge-notched, DEN), ed il provino soggetto a flessione per 3 punti con cricca in mezzeria (notched-bend test, NBT).

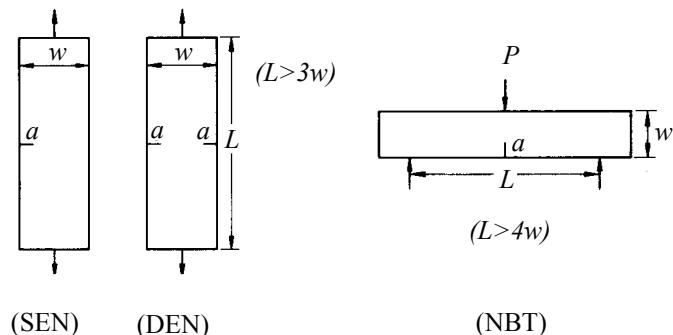


Fig.7 – Prova di resistenza a frattura: geometria dei provini utilizzati e nomenclatura.

Per ciascuna prova il valore critico del fattore di intensificazione delle tensioni viene determinato in pratica con le stesse formule usate per i materiali isotropi. Per tutte e tre le prove il valore critico del fattore di intensificazione delle tensioni è legato a carico, geometria e dimensioni iniziali della cricca dalla relazione generale:

$$K_{Ic} = \sigma_R \beta \sqrt{a} \quad (3)$$

nella quale σ_R è la tensione media di rottura a trazione per provini tipo SEN e DEN, la massima tensione di flessione alla rottura per provini tipo NBT. Il fattore geometrico β è lo stesso di quello usato per i materiali isotropi e vale:

per SEN:
$$\beta = 1.99 - .041\left(\frac{c}{w}\right) + 18.70\left(\frac{c}{w}\right)^2 - 38.48\left(\frac{c}{w}\right)^3 + 53.85\left(\frac{c}{w}\right)^4 \quad (4)$$

per DEN:
$$\beta = 1.98 + 0.36\left(\frac{2c}{w}\right) - 2.12\left(\frac{2c}{w}\right)^2 + 3.42\left(\frac{c}{w}\right)^3 \quad (5)$$

per NBT:
$$\beta = 1.93 - 3.07\left(\frac{c}{w}\right) + 14.53\left(\frac{c}{w}\right)^2 - 25.12\left(\frac{c}{w}\right)^3 + 25.80\left(\frac{c}{w}\right)^4 \quad (6)$$